

令和元年6月19日現在

機関番号：12101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K17549

研究課題名（和文）計算破壊力学に基づく鉄筋コンクリートのメゾスケール破壊進行メカニズムの解明

研究課題名（英文）Mechanism of fracture process of reinforced concrete in meso-scale based on computational fracture mechanics

研究代表者

車谷 麻緒（Kurumatani, Mao）

茨城大学・理工学研究科（工学野）・准教授

研究者番号：20552392

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：コンクリートまたは鉄筋コンクリートのメゾスケールにおける破壊挙動を再現するために、独自に定式化した損傷モデルを用いた破壊シミュレーション手法を開発した。本手法の特徴は、コンクリートの破壊力学と材料の損傷力学を組み合わせた定式化にある。この方法を用いて、コンクリートの破壊挙動を3次元で詳細に再現することができ、さらに実験結果とも定量的に一致することを検証した。

コンクリートの破壊機構を実験的に明らかにするために、デジタル画像相関法に基づく計測手法を開発した。この方法を用いて、コンクリートのメゾスケールにおける破壊挙動を計測し、ひび割れの発生・進展・開口を詳細に可視化することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

社会インフラの多くはコンクリート構造物である。コンクリートに破壊が生じると、構造物全体が崩壊する可能性があるため、コンクリートの破壊メカニズムを明らかにし、その挙動を精度よく予測するための技術が不可欠である。本研究では、破壊力学と損傷力学を組み合わせた力学モデルを構築し、コンクリートの破壊挙動を簡単に精度よく再現可能な数値シミュレーション手法を開発した。さらに、コンクリートの破壊プロセスを実験的に明らかにするために、デジタル画像を用いた計測手法を開発し、これを用いてコンクリートの破壊挙動を計測することで、ひび割れが発生・進展・開口する過程を詳細に可視化することができた。

研究成果の概要（英文）：A method for simulating fracture behavior of concrete and reinforced concrete using a damage model based on fracture mechanics was developed. An outstanding feature of the method is the formulation combined with fracture mechanics of concrete and damage mechanics of materials. Several numerical results reveal that the proposed method allowed the simulation of 3-dimensional fracture behavior in meso-scale, and good agreement was found between the numerical and experimental results.

To investigate experimentally the fracture process of concrete, a measuring method based on digital image correlation was developed. The experimental results showed that the crack propagation behavior in concrete's meso-structure could be measured and the crack opening behavior could also be visualized.

研究分野：計算力学，応用力学

キーワード：損傷モデル 破壊力学 鉄筋コンクリート ひび割れ デジタル画像相関法

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

社会インフラの多くはコンクリート構造物である。コンクリートに破壊が生じると、構造物全体の崩壊に発展する可能性があるため、安全・安心なコンクリート構造物を建設し、適切に維持管理していくには、コンクリートの破壊メカニズムを明らかにし、その力学挙動を精度よく予測するための解析技術が不可欠である。

鉄筋コンクリートの破壊挙動を3次元で詳細に再現するには、材料挙動がまったく異なる鉄筋とコンクリートを別々にモデル化し、異形鉄筋の幾何形状とコンクリートの材料不均一性を反映した数値シミュレーションを行う必要がある。しかし、固体解析や構造解析に一般的に用いられる有限要素法においては、変位の不連続性を伴うひび割れ進展挙動をモデル化するのが非常に困難であるため、鉄筋コンクリートの破壊挙動を3次元で詳細に再現可能な連続体解析手法は見当たらない。実際に用いられているコンクリートのモデル化は、現象論的な考え方に基づくものが多く、巨視的な応答を再現するためのモデル化である場合が多い。そのため、鉄筋コンクリート内部で生じている物理現象を観察できないばかりか、コンクリートの力学的特徴であるひび割れの発生・進展を適切に再現できていないのが現状である。

連続体力学が適用可能な数 cm のスケール、すなわちメソスケールに着目すると、コンクリートはモルタルと粗骨材の二相材料とみなすことができる。モルタルとコンクリートでは力学特性が明らかに異なることから、コンクリートにおいてはメソスケールでのひび割れ進展挙動に着目する必要がある。しかし、複雑なメソスケールでのひび割れ進展挙動を数値解析で再現するのは容易ではないうえ、メソスケールでのひび割れ進展挙動を実験的に計測して、破壊が進行していく過程を詳細に可視化した例も見当たらない。

2. 研究の目的

本研究の1つ目の目的は、連続体解析に基づく破壊シミュレーション手法を開発し、これを用いてコンクリート内部の破壊プロセスを3次元で詳細に再現することで、メソスケールにおけるコンクリートの破壊進行メカニズムを明らかにすることである。

2つ目の目的は、コンクリートのひび割れ進展挙動を詳細に計測可能な画像計測手法を開発し、これを用いてコンクリートのメソスケールの破壊プロセスを実験的に明らかにするとともに、解析結果と実験結果のひび割れ進展挙動を比較することで、本研究で開発する数値シミュレーション手法の妥当性を検証することである。

3. 研究の方法

まず、コンクリートのひび割れのモデル化には、連続体損傷モデルを適用する。この損傷モデルの特徴は、コンクリートの破壊力学と材料の損傷力学を組み合わせた定式化にあり、少ない数のパラメータにより、コンクリートの破壊挙動を精度よく再現することができる。また、メッシュサイズによる影響も小さいという特徴も有している。これをコンクリートのひび割れ進展挙動のモデル化に適用し、鉄筋の塑性変形のモデル化と組み合わせることで、鉄筋コンクリートの破壊挙動を3次元で精度よく再現することを試みる。鉄筋コンクリートの破壊挙動の再現精度を高めるために、有限ひずみを用いた定式化、および鉄筋とコンクリートの境界面での摩擦接触挙動のモデル化についても検討する。数値解析と同条件の実験を行い、実験結果と解析結果を比較することで、数値シミュレーションの妥当性を検証する。

コンクリートのひび割れ進展挙動を実験的に計測するために、デジタル画像関連法に基づく計測手法を開発する。ひび割れ進展挙動を詳細に計測できるように、高解像度デジタルカメラを用いて、画像計測が行える方法を独自に開発する。コンクリート試験体を切断し、内部構造を露出させた状態で載荷実験を行い、開発した画像計測手法を適用することにより、メソスケールにおけるコンクリートの破壊プロセスを可視化する。また、鉄筋コンクリートはりの曲げ試験に画像計測を適用し、計測されたひび割れ進展挙動と数値解析結果のひび割れ進展挙動を比較することで、損傷モデルを用いた破壊シミュレーションの妥当性を検証する。

4. 研究成果

損傷モデルを用いてコンクリートのひび割れ進展挙動をモデル化し、鉄筋の塑性変形のモデル化と組み合わせることで、鉄筋コンクリートの破壊挙動を精度よく再現するための破壊シミュレーション手法を開発した。

図-1は、せん断補強筋の異なる鉄筋コンクリートはりの4点曲げ試験に本手法を適用し、実験結果と比較した結果である。左のグラフより、数値解析の結果は実験結果と定量的にほぼ一致していることがわかる。右の可視化結果より、はり内部の3次元ひび割れ進展挙動が再現されていることが見て取れる。微小ひずみによる定式化および有限ひずみによる定式化ともに、実験結果を定量的に再現することを検証した。また、解析プログラムの並列化を行い、メッシュサイズの影響を検討した結果、本手法による解析結果はメッシュサイズの影響を受けにくいことを検証した。

鉄筋とコンクリートの界面での破壊挙動をモデル化するために、界面での摩擦接触を考慮した損傷モデルの定式化を行い、比較的単純な二相材料に対して数値実験を行った。その結果、界面の角度に応じて、物理的に妥当な摩擦すべり挙動を再現することができ、またメッシュサイズによる影響も小さいことを確認した。さらに、既往の文献に示されている実験結果との比

較を行い，圧縮力の大きさに対応した破壊挙動を再現可能であることを示し，またその結果は実験結果と定量的に一致することを確認した．

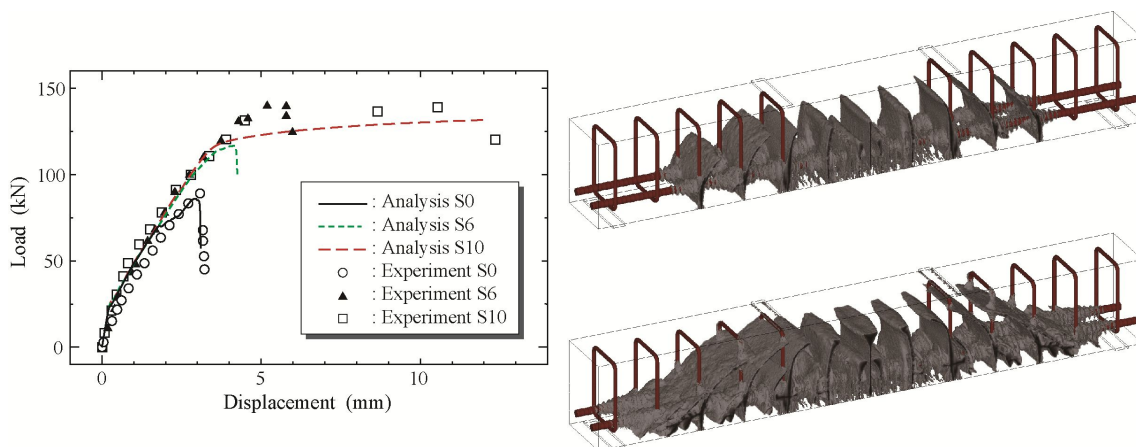


図-1 せん断補強筋の異なる鉄筋コンクリートはりの解析結果と実験結果

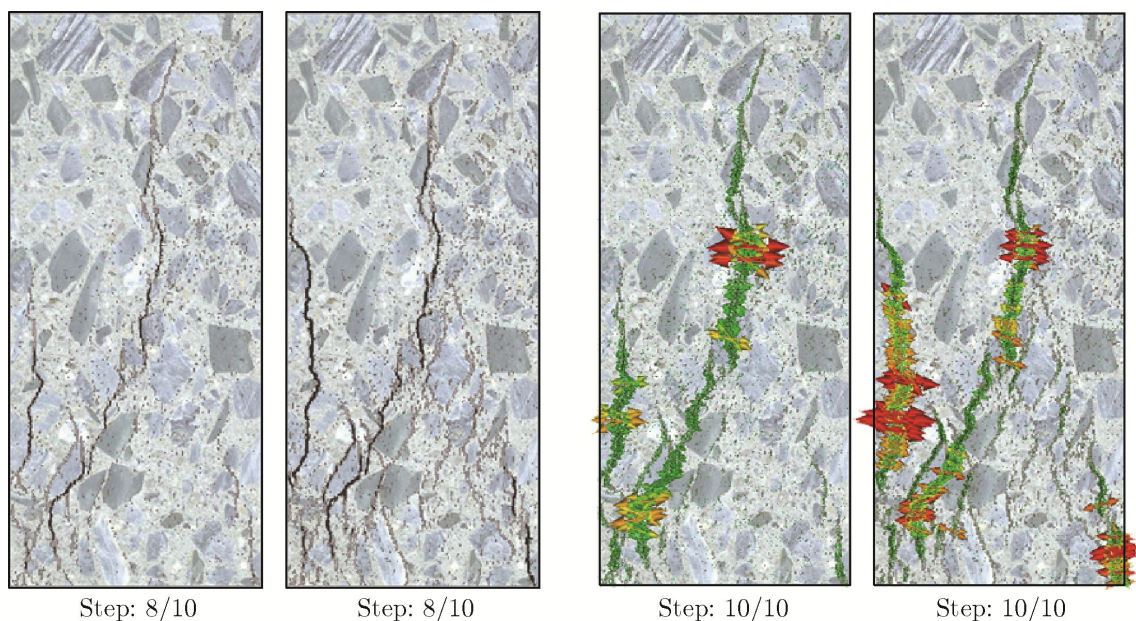


図-2 画像計測により得られたコンクリートのひび割れ進展挙動

コンクリートのメゾスケールにおける破壊プロセスを明らかにすることと，数値解析による再現されるひび割れ進展挙動の妥当性を検証するために，デジタル画像相関法に基づく画像計測手法を開発した．図-2 はコンクリート供試体を切断し，断面を露出させた状態で，本手法を用いてひび割れ進展挙動を計測した結果を示している．左の結果より，ひび割れが粗骨材の周辺で発生し，粗骨材を迂回しながらモルタル中を進展していく挙動が詳細に可視化されている．右の結果は，計測した最大主ひずみの大きさや最大主ひずみの方向を可視化した結果である．ひび割れの発生と進展だけでなく，開口する挙動も計測できていることがわかる．

さらに，開発した画像計測手法を鉄筋コンクリートはりの4点曲げ試験に適用し，鉄筋コンクリートに生じるひび割れ進展挙動を計測した．計測したひび割れ進展挙動と数値解析で再現したひび割れ進展挙動を比較することにより，損傷モデルを用いた破壊シミュレーションの結果は，図-1 に示した荷重 - 変位関係だけでなく，ひび割れ進展挙動も実験とほぼ同様であることを検証した．また，計測値のひずみと解析値のひずみを比較することにより，ひび割れ進展挙動を定量的に比較することも可能であることを示した．

5．主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 11 件)

Kurumatani M, Soma Y, Terada K, Simulations of cohesive fracture behavior of reinforced concrete by a fracture-mechanics-based damage model, Engineering Fracture Mechanics, 査読有,

Vol.206, pp.392-407, 2019
<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.12.006>
車谷麻緒, 小坏祐輔, 橋口和哉, 佐々木浩武, 会田涼太, 加藤匠, DIC 計測と非線形 FEM による RC はりの変形・破壊挙動の定量的比較, 土木学会論文集 A2(応用力学), 査読有, Vol.74/1, pp.107-116, 2018
<https://doi.org/10.2208/jscejam.74.107>
車谷麻緒, 会田涼太, 橋口和哉, 画像相関法による粗骨材周辺に発生・進展するひび割れの計測と可視化, 土木学会論文集 A2(応用力学), 査読有, Vol.74/2, pp.I_295-I_302, 2018
https://doi.org/10.2208/jscejam.74.I_295
相馬悠人, 車谷麻緒, 摩擦接触を考慮した損傷モデルによる準脆性材料の破壊シミュレーション, 土木学会論文集 A2(応用力学), 査読有, Vol.74/2, pp.I_233-I_241, 2018
https://doi.org/10.2208/jscejam.74.I_233
車谷麻緒, 相馬悠人, 有限ひずみ材料モデルを用いた鉄筋コンクリートの 3 次元破壊シミュレーションに関する基礎的検討, 日本計算工学会論文集, 査読有, Vol.2018, No.20182006, 2018
<https://doi.org/10.11421/jsces.2018.20182006>
車谷麻緒, 邊見哲一, 小坏祐輔, 橋口和哉, コンクリート供試体の圧縮試験に対するデジタル画像相関法の計測精度に関する基礎的検討, 土木学会論文集 A2(応用力学), 査読有, Vol.73/2, pp.I_447-I_454, 2017
https://doi.org/10.2208/jscejam.73.I_447
車谷麻緒, 邊見哲一, 岡崎慎一郎, 鉄筋コンクリートに生じる内部ひび割れの可視化に関する実験のおよび解析的検討, 土木学会論文集 A2(応用力学), 査読有, Vol.73/2, pp.I_439-I_446, 2017
https://doi.org/10.2208/jscejam.73.I_439
相馬悠人, 車谷麻緒, 破壊力学に基づく損傷モデルによる RC 部材の大規模破壊シミュレーションに関する基礎的検討, 土木学会論文集 A2(応用力学), 査読有, Vol.73/2, pp.I_263-I_271, 2017
https://doi.org/10.2208/jscejam.73.I_263
Kurumatani M, Anzo H, Kobayashi K, Okazaki S, Hirose S, Damage model for simulating chloride concentration in reinforced concrete with internal cracks, Cement and Concrete Composites, 査読有, Vol.84, pp.62-73, 2017
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.08.015>
車谷麻緒, 阿部俊逸, 相馬悠人, 寺田 賢二郎, コンクリートの破壊力学と修正 von-Mises 基準に基づく等方性の有限ひずみ損傷モデル, 土木学会論文集 A2(応用力学), 査読有, Vol.73/1, 11-21, 2017
<https://doi.org/10.2208/jscejam.73.11>
相馬悠人, 根本優輝, 車谷麻緒, コンクリートの破壊力学に基づく損傷モデルを用いたせん断補強筋の異なる RC はりの 3 次元破壊シミュレーション, 土木学会論文集 A2(応用力学), 査読有, Vol.72/2, pp.I_247-I_255, 2016
https://doi.org/10.2208/jscejam.72.I_247

[学会発表](計 20 件)

Kurumatani M, Koakutsu Y, Hashiguchi K, Comparison of fracture behavior in concrete between FEM and DIC, 13th World Congress on Computational Mechanics, July, 2018 (New York)
Soma Y, Kurumatani M, Fracture Simulation Using a Damage Model Considering Contact and Frictional Sliding, 13th World Congress on Computational Mechanics, July, 2018 (New York)
車谷麻緒, 小坏祐輔, 橋口和哉, DIC と FEM による RC はりの破壊挙動の定量的比較, 第 23 回計算工学講演会, 2018
相馬悠人, 車谷麻緒, 損傷モデルによる接触や摩擦すべりを含むひび割れ進展挙動のシミュレーション, 第 23 回計算工学講演会, 2018
会田涼太, 加藤匠, 車谷麻緒, 粗骨材による非均質性を考慮したコンクリートの破壊挙動の計測と数値解析, 第 23 回計算工学講演会, 2018
相馬悠人, 車谷麻緒, 摩擦接触を考慮した損傷モデルによる準脆性材料のひび割れ進展解析, 第 73 回土木学会年次学術講演会, 2018
加藤匠, 佐々木浩武, 車谷麻緒, 非均質性を考慮した損傷モデルによるコンクリートの 3 次元破壊シミュレーション, 第 73 回土木学会年次学術講演会, 2018
会田涼太, 橋口和哉, 小坏祐輔, 車谷麻緒, 画像相関法を用いた骨材周辺に発生するひび割れの計測と可視化, 第 73 回土木学会年次学術講演会, 2018
Kurumatani M, Soma Y, 3D fracture simulation of reinforced concrete using damage model based on fracture mechanics for concrete, 14th US National Congress on Computational Mechanics, July, 2017 (Montreal, Canada)
Soma Y, Kurumatani M, Basic study on large scale fracture simulation of RC members using damage model based on fracture mechanics, 2nd International Conference on Computational

Engineering and Science for Safety and Environmental Problems, October, 2017 (Chengdu, China)
橋口和哉，邊見哲一，小塚祐輔，車谷麻緒，デジタル画像相関法によるコンクリート供試体のひずみとひび割れの計測精度に関する検討，第 22 回計算工学講演会，2017
相馬悠人，車谷麻緒，メッシュサイズに依存しない損傷モデルによる RC 部材の 3 次元破壊シミュレーション，第 22 回計算工学講演会，2017
小塚祐輔，邊見哲一，車谷麻緒，FEM と DIC による鉄筋コンクリートの破壊挙動の再現と可視化，第 22 回計算工学講演会，2017
車谷麻緒，相馬悠人，有限ひずみ損傷モデルによる RC はりの 3 次元破壊シミュレーション，第 22 回計算工学講演会，2017
相馬悠人，車谷麻緒，破壊力学に基づく損傷モデルによる RC 部材の大規模破壊シミュレーションに関する基礎的検討，第 72 回土木学会年次学術講演会，2017
Kurumatani M, Henmi N, Soma Y, Simulation and measurement of crack propagations in concrete toward the V&V analysis, 12th World Congress on Computational Mechanics, July, 2016 (Seoul)
Kurumatani M, Soma Y, Abe S, Fracture simulation of reinforced concrete using an isotropic damage model based on fracture mechanics, 12th World Congress on Computational Mechanics, July, 2016 (Seoul)
車谷麻緒，阿部俊逸，相馬悠人，寺田賢二郎，マルチステージ破壊シミュレーションのためのコンクリートの有限変形損傷モデルの開発，第 21 回計算工学講演会，2016
相馬悠人，阿部俊逸，車谷麻緒，幾何学的非線形性を考慮した鉄筋コンクリートはりの 3 次元破壊シミュレーション，第 71 回土木学会年次学術講演会，2016
邊見哲一，車谷麻緒，岡崎慎一郎，画像解析を用いた RC はりに発生する内部ひび割れ進展挙動の計測と可視化，第 71 回土木学会年次学術講演会，2016

6 . 研究組織

(1)研究分担者
なし

(2)研究協力者

研究協力者氏名：岡崎 慎一郎

ローマ字氏名：(OKAZAKI, Shinichiro)

研究協力者氏名：相馬 悠人

ローマ字氏名：(SOMA, Yuto)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。